

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.03.013

预应力混凝土连续箱梁顶底板 搭接索拉-压杆分析

张文学¹, 吴海军², 王景景¹

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要: 针对目前预应力混凝土连续箱梁腹板1/4跨附近开裂现象比较普遍, 已严重影响该类桥梁的安全性和耐久性这一问题。分别以重庆石板坡长江大桥和钟祥汉江大桥为例, 采用拉-压杆理论, 建立拉-压杆模型, 研究顶、底板纵向搭接索引起的竖向拉力对预应力混凝土连续箱梁腹板受力状态的影响。在分析顶、底板搭接索反拱石机理的基础上, 对预应力混凝土连续箱梁顶、底板纵向搭接索引起的腹板竖向拉力进行了拉-压杆模型分析。研究表明预应力混凝土箱梁顶、底板纵向搭接索可在腹板内引起较大的竖向拉力, 并提出了相应的设计注意事项。

关键词: 桥梁工程; 反拱石; 拉-压杆; 腹板; 开裂

中图分类号: U448.35

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2012) 03-0070-04

Analysis of PC Continuous Box Girder Top and Bottom Overlap Tendon with Strut-and-tie Method

ZHANG Wenxue¹, WU Haijun², WANG Jingjing¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The phenomenon of web cracks of continuous PC box girder at 1/4 span is fairly common and has influenced the bridge's safety and durability. Taken Shibampo bridge and Zhongxiang Hanjiang bridge as examples, the strut-and-tie model was built by using strut-and-tie theory. Then the influence of vertical tensile force caused by top and bottom slabs' longitudinal tendons on the stress of prestressed concrete box girder web were studied. Based on the analysis of inverse key-stone mechanism of the tendons, the continuous PC box girder web's vertical tension force caused by longitudinal overlap tendon in top and bottom slabs was analyzed by strut-and-tie method. The research result shows that a rather vertical tensile force could be caused by top and bottom tendons at PC box girder web. Some corresponding designing attention was put forward.

Key words: bridge engineering; inverse key-stone; strut-and-tie; web; cracking

0 引言

自20世纪70年代以来, 在我国公路桥梁建设中, 无论是城市道路高架桥, 跨越江河的中等跨径桥梁, 都大量采用了预应力混凝土连续箱梁或连续刚构的结构形式。目前对预应力混凝土连续箱梁一

般均按照全预应力设计, 要求结构混凝土中不出现拉应力^[1], 但预应力混凝土连续箱梁腹板开裂已经成为我国该类桥梁的通病, 特别是在1/4L附近的顶、底板纵向索搭接梁段, 而且此处裂缝多起自底板纵向索锚后, 然后斜向上延伸至与之搭接的顶板纵向索锚后, 形成对结构危害极大的贯通斜裂

缝^[2-3]。由于目前在我国预应力混凝土连续箱梁腹板开裂现象比较普遍,因此专家学者分别从材料特性、温度应力和施工等角度对开裂原因进行了较为深入的分析^[4-5],但很少见从预应力混凝土连续箱梁顶、底板纵向搭接索引起的剪切效应角度对腹板开裂原因进行研究资料。通过大量调查认为顶、底板纵向搭接索梁段腹板斜裂缝可能与设计时采用平截面假定为基础的梁单元进行设计验算时无法考虑顶、底板纵向搭接索引起的竖向拉力有关^[6-7]。为研究顶、底板纵向搭接索引起的竖向拉力对预应力混凝土连续箱梁腹板受力状态的影响,本文分别以重庆石板坡长江大桥(复线桥)和钟祥汉江大桥为例,采用拉-压杆模型对顶、底板纵向搭接索引起的竖向拉力进行初步探,得到了一些有意义的结论。

1 工程概况

(1) 重庆石板坡大桥工程概况:重庆石板坡长江大桥加宽改造工程去掉6号墩外,其余桥墩与原桥一一对应,其结构形式为1 101 m全连续刚构,桥跨布置为(86.5 + 4 × 138 + 330 + 132.5) m,在330 m主跨采用钢-混凝土结合连续刚构方案,跨中为108 m的钢箱梁结构;纵向预应力采用公称直径15.24 mm的预应力钢绞线,极限抗拉强度 $R_y = 1\ 860$ MPa;竖向预应力采用高强精轧螺纹钢,每侧腹板布置2排,纵向间距50~55 cm,每根控制张拉力542 kN。设计基准周期为100 a,设计荷载为城A级。

(2) 钟祥汉江大桥工程概况:钟祥汉江公路大桥主桥为五孔一联的预应力连续箱梁桥,桥跨布置为(65 + 3 × 100 + 65) m,主梁为单箱单室、倾斜腹板形式。该桥1993年11月18日竣工通车,2005年经检测定为危桥,随后采用挂篮法拆除。纵向预应力筋为24 Φ 5 高强钢丝,每束控制张拉力为588 kN,弗氏锚具。竖向预应力钢筋每侧腹板布置一排,纵向间距为50 cm,冷拉Ⅳ级粗钢筋40Si2V,直径 Φ 25,每根控制张拉力为331 kN。

钟祥汉江大桥主要病害:(1)箱梁底板裂缝:主要分布在第2跨、第4跨的跨中部位,底板裂缝均已裂穿底板,局部裂穿至腹板顶缘,裂缝宽度0.3~0.7 mm。(2)箱梁顶板裂缝:该桥每跨顶板均发现裂缝,顶板裂缝主要分布在箱梁第1号节段两端,顶板裂缝已贯穿板厚。(3)箱梁腹板裂缝:箱梁每一跨均发现腹板45°左右斜裂缝,其中第2、4跨分布较广,较为严重,裂缝区域集中在1/4L截面处,其中第1跨30条、第2跨76条、第3跨77条、

第4跨113条、第5跨31条。(4)跨中下挠:第2跨跨中挠20.5 cm,第4跨跨中挠16.2 cm。

2 顶底板纵向搭接索段拉-压杆分析

2.1 顶底板纵向搭接索反拱石效应

如图1所示,在顶、底板纵向索搭接梁段附近,由于顶、底板纵向预应力索的剪切作用,会在腹板中引起较大的竖向拉力,同时由于底板纵向索张拉会在其锚后引起较高的拉应力,而该段恰好处于反弯点附近,在动荷载作用下可能处于受拉状态,如设计稍有不当,便有可能在底板纵向索锚后出现牵拉裂缝,此裂缝会斜向上延伸到顶板索锚固点附近,在腹板内形成贯通斜裂缝,使连续梁跨中形成与拱顶石形状相反的结构,即反拱石现象^[7],该裂缝对连续梁桥的危害极大。

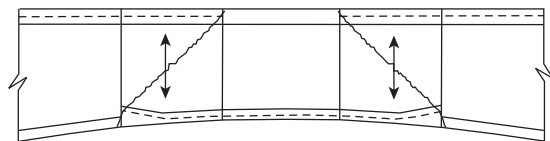


图1 反拱石示意图

Fig. 1 Schematic diagram of inverse key-stone

在采用拉-压杆模型对顶、底板纵向索搭接梁段进行分析前,有必要对反拱石现象的产生机理进行分析。如图2所示,反拱石效应由2部分组成。

根据预应力混凝土箱梁实际施工过程可知,在张拉顶板索时,截面②-③右侧为自由面,所以相当于在图2中点②处施加荷载 F_{y2} ,由于此时没有张拉底板纵向预应力筋,因此不会产生反拱石效应。当张拉底板纵向预应力筋时,在截面①-④左右两侧均为非自由面,因此在张拉预应力筋时必然在③点和④点产生相应的反力 F_{k3} 和 F_{k4} 。通过进一步分析可知,反拱石效应分别由剪切变形所引起的剪切效应和由于预应力荷载作用方向与该荷载在结构内部的传递方向之间存在一定的夹角 θ 而引起的夹角效应组成。

2.2 顶底板纵向搭接索拉压杆分析

为分析顶、底板纵向搭接索引起的腹板竖向拉力现象,分别以重庆石板坡长江大桥和钟祥汉江大桥为研究对象,根据其顶、底板纵向预应力索的布置情况,参照实际施工过程,建立如图3所示的拉-压杆模型^[8-9],对石板坡长江大桥第1跨和钟祥汉江大桥第2跨顶、底板纵向索搭接梁段进行了拉-压杆模型分析,分析得成桥状态各截面竖向拉杆内力如表1、2所示,表中内力拉为正,压为负,拉杆编号

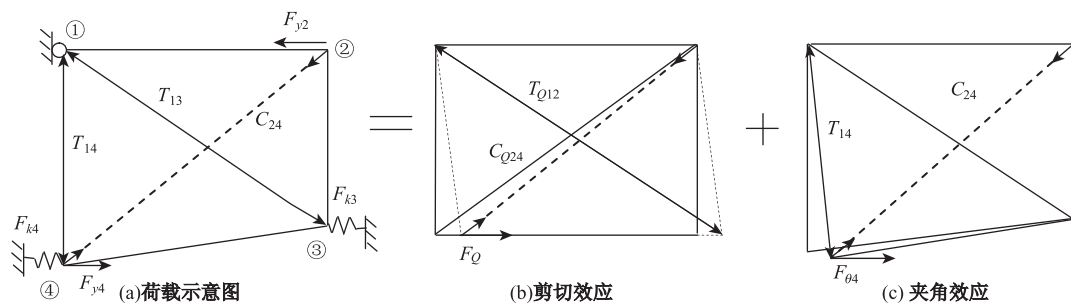


图2 反拱石机理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of inverse key-stone's mechanism

从1到 n 依次靠近跨中。

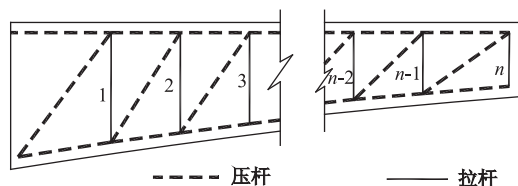


图3 拉-压杆模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of strut-and-tie model

表1 石板坡大桥纵向索搭接梁段拉-压杆分析结果

Tab. 1 Analysis result of Shibampo bridge's overlap tendon segment using strut-and-tie model

编号	不同工况总剪力/kN			搭接索引起竖向力及比重/kN	
	底板索张拉前 Q_u	张拉底板索 Q_t	最不利工况 Q_m	$Q_y = Q_t - Q_u$	$Q_y/Q_m \times 100\%$
1	5 974	7 297	8 872	1 323	14.9
2	5 686	7 019	8 510	1 333	15.7
3	5 386	6 722	8 113	1 336	16.5
4	5 263	6 526	7 857	1 264	16.1
5	4 880	6 082	7 318	1 203	16.4
6	4 375	5 451	6 550	1 076	16.4
7	3 849	4 770	5 702	921	16.1
8	3 006	3 383	3 999	377	9.4
9	2 012	2 406	2 762	394	14.2

注:该桥每个竖向拉杆范围内的设计竖向预应力为12 234 kN。

表2 钟祥汉江大桥纵向索搭接段拉-压杆分析结果

Tab. 2 Analysis result of Zhongxiang Hanjing bridge's overlap tendon segment using strut-and-tie model

编号	不同工况总剪力/kN			搭接索引起竖向力及比重/kN	
	底板索张拉前 Q_u	底板索张拉后 Q_t	最不利工况 Q_m	$Q_y = Q_t - Q_u$	$Q_y/Q_m \times 100\%$
1	1 797	2 500	3 080	703	22.8
2	1 746	2 411	2 979	665	22.3
3	1 658	2 268	2 809	610	21.7
4	1 505	2 066	2 559	561	21.9
5	1 337	1 777	2 206	440	20.0
6	1 097	1 423	1 764	325	18.4
7	811	1 035	1 273	224	17.6

注:该桥每个竖向拉杆范围内的设计竖向预应力为2 928 kN。

通过对预应力混凝土箱梁顶、底板纵向索搭接梁段拉-压杆模型分析表明:

(1) 通过拉-压杆模型分析得重庆石板坡大桥在恒载+城A活载作用下,腹板最大的拉杆内力为8 872 kN,该桥竖向拉杆范围内设计竖向预压力为12 234 kN,由此可知该梁段在不发生较大竖向预应力损失的情况下,腹板竖向处于受压状态。

(2) 通过拉-压杆模型分析得钟祥汉江大桥在恒载+公路-I级活载作用下,考虑顶、底板纵向搭接索引起的竖向拉力时,腹板最大的拉杆内力为3 080 kN,而在不考虑顶、底板纵向搭接索引起的竖向拉力时,腹板最大的拉杆内力为2 377 kN,该桥竖向拉杆范围内设计竖向预压力为2 928 kN。由此可知在不发生竖向预应力损失的情况下,虽然按梁单元计算腹板是处于竖向受压状态的,但是考虑了顶、底板纵向搭接索引起的竖向拉力后,该桥腹板竖向已经处于受拉状态。

(3) 通过对石板坡大桥和钟祥大桥的对比分析可知:在这2座桥中,单纯由顶、底板纵向搭接索引起的腹板竖向拉力均比较大,其绝对值分别高达1 336 kN和703 kN;该拉力在相应截面总剪力中的比例分别为15%和20%左右;分别占设计竖向预压力的11%和24%。因此由于顶、底板纵向搭接索引起的腹板竖向拉力不容忽视。

(4) 顶、底板纵向搭接索引起的竖向拉力效应在最长的底板纵向索锚固截面最大,然后向跨中截面逐渐减小,因此在具体设计时应应对最长的底板纵向索锚固截面加以重视。

2.3 矢跨比对搭接索引起竖向拉力影响

为了分析变高度连续梁桥的矢高与跨度之比,即矢跨比对顶、底板纵向搭接索引起的竖向拉力效应的影响,以石板坡大桥第1跨为原型,改变矢跨比,得不同矢跨比下单纯由顶、底板纵向搭接索张拉引起的腹板竖向拉力和二期恒载+活载所引起的

腹板竖向拉力变化规律如图4所示。由此可知:矢跨比对顶、底板纵向搭接索引起的腹板竖向拉力有较大影响,矢跨比越大,引起的竖向拉力越大;在不考虑结构剪切效应的情况下,矢跨比为0时,即梁高为等高度的情况下,不产生竖向拉力,没有反拱石效应。随着矢跨比的增大,二期荷载+活载所引起的腹板竖向拉力越小;但两者之和(图中1+2)随矢跨比的增大略有增加。

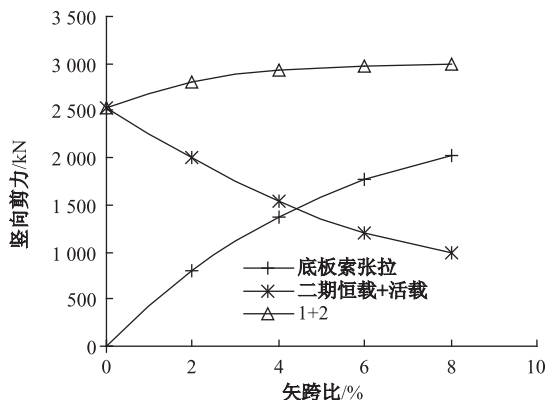


图4 矢跨比对搭接索引起竖向拉力影响

Fig. 4 Influence of rise-span ratio on vertical tension at overlap tendon segment

3 结论

以重庆石板坡大桥和钟祥汉江大桥为例,在分析顶、底板纵向搭接索梁段反拱石效应机理的基础上,采用拉-压杆模型法对预应力混凝土连续箱梁顶、底板纵向搭接索在腹板内引起的竖向拉力进行了分析,通过分析得到如下主要结论:

(1) 顶、底板纵向索搭接梁段的反拱石效应由剪切效应和夹角效应2部分组成。

(2) 预应力混凝土箱梁顶、底板纵向搭接索可在腹板内引起较大的竖向拉力,该拉力在相应截面总剪力中所占比例比较高,因此由顶、底板纵向搭接索引起的腹板竖向拉力不容忽视。

(3) 顶、底板纵向搭接索引起的竖向拉力随矢跨比的增大而增大,且最长底板纵向索引起的竖向拉力最大,因此在具体设计时应应对最长的底板纵索锚固截面加以重视。

参考文献:

References:

[1] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].

JTG D62—2004, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prstressed Concrete Bridges and Culverts [S].

[2] 张文学. 预应力混凝土连续箱梁局部应力分析及拉-压杆设计 [D]. 上海: 同济大学, 2005.

ZHANG Wenxue. Analysis of Local Stress of Continuous PC Box Girder and Strut - and - tie Design Methods [D]. Shanghai: Tongji University, 2005.

[3] 张继尧, 王昌将. 悬臂浇筑预应力混凝土连续梁桥 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

ZHANG Jiyao, WANG Changjiang. Cantilever Constructed PC Continuous Girder Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.

[4] 张文学, 龙佩恒, 王丽群. 预应力混凝土连续箱梁不同布索方式对比分析 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (9): 80 - 84.

ZHANG Wenxue, LONG Peiheng, WANG Liqun. Analysis of Different Tendon Layout Types for PC Continuous Box Girder [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (9): 80 - 84.

[5] 龙佩恒. 预应力混凝土箱梁桥开裂的数值分析方法 [D]. 上海: 同济大学, 2005.

LONG Peiheng. Numerical Method to Analyze Cracks in PC Box Girder Bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 2005.

[6] 浙江省交通厅公路管理局. 预应力混凝土箱型连续梁桥裂缝调查分析及防治研究报告 [R]. 浙江: 浙江省交通厅公路管理局, 2000.

Highway Administration of Zhejiang Provincial Communications Department. The Report of Investigation, Research and Prevention of PC Box Girder Cracks [R]. Highway Administration of Zhejiang Provincial Communications Department, 2000.

[7] YUN Y M. Nonlinear Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete [J]. ACI Structural Journal, 2000, 97 (4): 581 - 590.

[8] PODOLNY W, Jr. The Cause of Cracking in Post-tensioned Concrete Box Girders and Retrofit Procedures [J]. PCI Journal, 1985, 3: 82 - 139.

[9] SCHLAICH J, SCHAFER K. Design and Detailing of Structural Concrete Using Strut-and-Tie Models [J]. Structural Engineering, 1991, 69 (6): 113 - 125.

[10] 周履. 压杆-拉杆模型混凝土结构设计中的应用 [J]. 世界桥梁, 2002 (2): 1 - 9.

ZHOU Lü. Using Strut-and-Tie Model to Design Concrete Structure [J]. Foreign Bridges, 2002 (2): 1 - 9.